

**RESTAURACIÓN DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN CON GENERACIÓN
DISTRIBUIDA USANDO TEORÍA DE GRAFOS**

ALEXANDER MUÑOZ TOBON

**INGENIERÍA ELÉCTRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
PEREIRA, AGOSTO DE 2021**

**RESTAURACIÓN DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN CON GENERACIÓN
DISTRIBUIDA USANDO TEORÍA DE GRAFOS**

ALEXANDER MUÑOZ TOBON

**PROYECTO DE GRADO
PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**DIRECTOR
RICARDO ALBERTO HINCAPIÉ ISAZA**

**INGENIERÍA ELÉCTRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
PEREIRA, AGOSTO DE 2021**

Dedicatoria

A mi madre Isabel Tobón, a mi padre Heli Muñoz, fuentes inagotables de amor y cariño, a mi hermano Elier Muñoz, cómplice y amigo; mi querida familia que, con su incansable apoyo, persistencia, ejemplo, guía y amor incondicional, hicieron posible cumplir esta anhelada meta.

Agradecimientos

- Al Ricardo Alberto Hincapié Isaza, valiosísimo ser humano, inmensos agradecimientos, su guía, amplios conocimientos, gran paciencia y dedicación fueron fundamentales para lograr cumplir esta meta.
- Al Ingeniero Julián Rodríguez, por su constante colaboración y apoyo, por brindarme todo su conocimiento y experiencia, al amigo y al profesional. Inmensos agradecimientos.
- A mis tías y primos que siempre me brindaron su apoyo y cariño muchas gracias.
- A la vida que da segundas oportunidades.

El autor

Contenido

Capítulo 1.....	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Descripción del problema	2
1.3 Organización del documento	5
Capítulo 2.....	6
2.1 Sistemas de distribución	6
2.1.1 Redes radiales	7
2.1.2 Redes en anillo	8
2.2 Cargas especiales	8
2.3 Generación distribuida	9
Capítulo 3.....	10
3.1. Técnica heurística.....	11
3.2. Flujo de potencia	11
3.3. Metodología propuesta	12
3.3.1. Aislamiento de falla e identificación de los elementos desconectados.....	12
3.3.2. Líneas de respaldo candidatas para el proceso de restauración	13
3.3.3. Criterios de decisión para ordenar las líneas de respaldo candidatas para el proceso de restauración	14
3.3.4. Restauración	18
Capítulo 4.....	21
Aplicación y resultados	21
4.1 Caso 1 – Falla en el nodo 36	21
4.1.1 Escenario 1	23
4.1.2 Escenario 2	25
4.1.3 Escenario 3	27
4.1.4 Escenario 4	29
4.2 Caso 2 – Falla en el nodo 1	29
4.2.1 Escenario 1	30
4.2.2 Escenario 2	32
4.2.3 Escenario 3	34

4.2.4 Escenario 4	36
4.3 Consolidado de los resultados obtenidos	38
Capítulo 5.....	40
Conclusiones y trabajos futuros.....	40
5.1. Conclusiones	40
5.2 Trabajos futuros.....	41
Bibliografía	42

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 2.1. Red de distribución radial	7
Figura 2.2. Red de distribución en anillo	8
Figura 3.1. Red radial con reconectores normalmente cerrados (NC) y abiertos (NA)	10
Figura 3.2. Sistema de distribución - 16 nodos	13
Figura 3.3. Fallo en nodo 3	14
Figura 3.4. Red después del fallo	15
Figura 3.5. Áreas de demanda para cargas especiales	15
Figura 3.6. Áreas de demanda	16
Figura 3.7. Capacidad de corriente	17
Figura 3.8. Deltas de corriente asociados a cada posible línea de restauración	18
Figura 3.9. Red totalmente restaurada	19
Figura 3.10. Diagrama de flujo de la metodología propuesta	20
Figura 4.1. Sistema de prueba	22
Figura 4.2. Sistema de prueba restaurado – Caso 1, Escenario 1	24
Figura 4.3. Sistema de prueba restaurado – Caso 1, Escenario 2	26
Figura 4.4. Sistema de prueba restaurado – Caso 1, Escenarios 3 y 4	28
Figura 4.5. Sistema de prueba restaurado – Caso 2, Escenario 1	31
Figura 4.6. Sistema de prueba restaurado – Caso 2, Escenario 2	33
Figura 4.7. Sistema de prueba restaurado – Caso 2, Escenario 3	35
Figura 4.8. Sistema de prueba restaurado – Caso 2, Escenario 4	37

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 4.1. Comparación de resultados obtenidos	38

Capítulo 1

1.1 Introducción

Los sistemas de distribución de energía eléctrica deben velar por garantizar un suministro de energía de calidad y alta confiabilidad para el usuario final. En aras de lograr estos objetivos, los Operadores de Red (OR) han modernizado los sistemas con relación a dispositivos automáticos de protección, que detectan de manera autónoma todo tipo de falla y las disipan por medio de cambio de estado de los elementos. Estos dispositivos pueden actuar de manera autónoma, de manera remota desde el centro de control del sistema de distribución o de manera manual por un operario. El uso de estos dispositivos permite minimizar el tiempo de aislamiento del fallo, tiempo de restauración de la red luego de clarificado y disminuir las salidas innecesarias de cargas.

Tan pronto es detectada una falla de tipo permanente por el centro de control, se deben iniciar un conjunto de maniobras que permitan retornar el sistema a su estado normal de operación. Dichos procedimientos pueden requerir de extensos tiempos de respuesta, dado que en muchos casos incluso es necesario desplazar operarios hasta el punto de fallo para lograr clarificarlo. De manera simultánea, desde el centro de control se debe buscar la forma de energizar nuevamente la mayor cantidad de usuarios desconectados que sea factible, en el menor tiempo posible, dado que la cantidad de carga recuperada y el tiempo que se toma para restaurarla afecta de forma directa y en gran medida los índices de calidad y confiabilidad del sistema de distribución. Para lograr este objetivo, el OR debe realizar un conjunto de acciones precisas y adecuadas que permitan garantizar una restauración eficiente y en tiempo real del sistema de distribución, operación que es cada vez más compleja debido al crecimiento y desarrollo de los sistemas de distribución de energía eléctrica, siendo necesario contar con herramientas computacionales que guíen al operario en los pasos a realizar para garantizar una restauración eficiente.

En la actualidad, una de las tendencias más importantes que se han venido desarrollando en el campo de los sistemas de distribución eléctrica son la inclusión de generadores distribuidos (GD), que consiste en pequeñas plantas generadoras que se conectan en la red de distribución cerca al usuario final, aprovechando de esta forma el uso de fuentes alternativas de generación como los son la generación eólica, solar, y generación térmica con biocombustibles, entre otras.

Sin embargo, la inclusión de estas fuentes afecta directamente las condiciones operativas del sistema.

Por otro lado, es importante tener presente que los sistemas de distribución cuentan con algunos tipos especiales de usuarios, que, debido a sus características con relación a sus requerimientos de calidad y continuidad de suministro de energía, se categorizan como cargas especiales. Estas cargas pueden ser centros hospitalarios, centros de acopio de medicamentos que requieren refrigeración, o entidades municipales o gubernamentales, entre otros, las cuales requieren garantizar cierta priorización para ser reconectadas dentro de los procesos de restauración.

1.2 Descripción del problema

Las redes de distribución de energía eléctrica deben garantizar un servicio continuo y confiable, y es a través de índices y normas operativas que las entidades reguladoras logran garantizar estándares de continuidad y calidad en el servicio.

Los sistemas de distribución generalmente se encuentran en estado normal de operación, lo que implica que todas las cargas conectadas al sistema se encuentran energizadas y todas las restricciones de operación están siendo cumplidas. Sin embargo, las redes de distribución, como todo sistema real, está expuesto a contingencias. Entre las fallas que más se presentan se tienen descargas atmosféricas, corto circuitos y sobrecargas, entre otras, las cuales ocasionan salidas de operación de zonas completas de la red que pueden ser temporales o permanentes, afectando la operación del sistema por la desconexión de carga y/o violación de las restricciones operativas.

La inclusión de GD en los sistemas de distribución de energía eléctrica y la presencia de cargas especiales incrementan el nivel de complejidad del problema de la restauración. Verificar la incidencia de los GD y la presencia de cargas especiales proporciona herramientas más precisas de planificación de las redes de distribución y mejora las capacidades de reacción de las centrales de control del sistema de distribución de energía eléctrica ante contingencias.

Para dar solución a este problema, los OR cuentan con equipos de maniobra y/o protección (reconectadores, seccionadores, fusibles), los cuales al operar en estados de apertura o cierre, aíslan la zona de fallo y buscan reducir el impacto del fallo en la red, lo que consiste en minimizar la cantidad de energía no servida y restaurar el servicio a los usuarios, en el menor tiempo posible.

Cuando el sistema de distribución es automatizado, al presentarse una contingencia las protecciones actúan aislando la zona donde el fallo tuvo lugar. Seguidamente se inicia el proceso de restauración del servicio, transfiriendo cargas a otros alimentadores por medio de la acción de apertura y cierre de los dispositivos de protección automáticos. Al realizarse este proceso, se debe buscar la forma de minimizar la energía no servida y garantizar el cumplimiento de restricciones de operación, como lo son los límites de tensión, capacidad de alimentadores y restricciones topológicas, entre otras. Es de tener en cuenta que durante el estado de emergencia las restricciones de operación se pueden relajar en cierta medida durante el estado de emergencia.

Debido a que los sistemas de distribución presentan una estructura compleja y gran diversidad de dispositivos de apertura y cierre, la restauración del servicio se convierte en un problema de optimización combinatorial que requiere elevados tiempos computacionales para obtener soluciones de buena calidad, razón por la cual el tema de la restauración del servicio de energía en los sistemas de distribución ha tenido una amplia discusión en el sector eléctrico. A continuación, se presenta una revisión de los trabajos más relevantes en esta temática.

En [1] se propone un método de solución al problema de la restauración por medio de una búsqueda heurística sobre un árbol de decisión binario, que permite reducir el espacio de búsqueda. Se considera un problema híbrido restauración-reconfiguración, en el cual se busca restaurar la carga y de forma paralela balancear la carga en los alimentadores.

En [2] se presenta un plan de restauración basado en un algoritmo computacional de búsqueda heurística, el cual ha sido probado en el sistema de distribución de la empresa de energía eléctrica de Taiwán, mostrando resultados satisfactorios.

En [3] se propone una solución al problema de la restauración basada en un algoritmo de reducción de los interruptores a operar, con base en índices de estados basados en las tensiones nodales y las corrientes de línea, buscado reducir las pérdidas y permitiendo mallas de operación temporal.

En [4] se aplica una expansión de árboles con algoritmos evolutivos. Para dar solución, los autores proponen un algoritmo de expansión de árbol aleatorio, el cual se basa en los algoritmos de expansión mínima de Prim y Kruskal, con pasos aleatorios.

En [5] se evalúa el efecto de la ubicación y el tamaño de la generación distribuida en las pérdidas de energía y el perfil de tensión durante la restauración. La ubicación de la generación distribuida se identifica utilizando índices de sensibilidad predeterminados, mientras que la programación evolutiva se utiliza para determinar el tamaño de los generadores instalados.

En [6] se presenta un algoritmo de reconfiguración que minimiza la energía no servida en redes de distribución de media tensión. Los algoritmos se basan en teoría de grafos y una formulación iterativa para la energía no servida. Se realiza una compresión heurística del grafo a lo largo de la ejecución del algoritmo que reduce la dimensión del problema, produciendo así un ahorro sustancial de tiempo de ejecución, a costa de la posible obtención de una solución óptima.

En [7] se propone una solución al problema de reconfiguración de alimentadores para sistemas de distribución con generadores distribuidos, durante procesos de restauración. Se aplica un algoritmo de búsqueda tabú para buscar los patrones óptimos de desconexión de los interruptores de seccionamiento, buscando obtener las mínimas pérdidas de potencia. También, se realiza una solución al despacho óptimo de los generadores distribuidos que da el mínimo costo total de generación, satisfaciendo las restricciones operativas del sistema y beneficiándose del ahorro en reducción de las pérdidas de potencia y del costo de generación.

En [8] se plantea una solución al problema de la restauración del servicio en sistemas de distribución usando técnicas heurísticas. Se aplica un ordenamiento nodal aprovechando la característica radial de las redes de distribución y se realiza la restauración nodo a nodo siguiendo una función de peso y factores de sensibilidad.

En [9] se presenta una evaluación de la confiabilidad de los sistemas de distribución con presencia de generación distribuida. Para ello se realiza un modelado de la red a nivel de alimentadores, considerando a los ramales de la red como cargas concentradas y aplicando el escenario de estudio por demanda media. Se determinan índices de confiabilidad para los alimentadores con y sin la presencia de generación distribuida, y con base a los resultados obtenidos, se recomiendan modificaciones con el propósito de mejorar la confiabilidad de la red.

En este trabajo se presenta una metodología basada en técnicas heurísticas usando teoría de grafos, para resolver el problema de la restauración del servicio en sistemas de distribución, verificando la incidencia de la presencia de la generación distribuida y las cargas especiales en dicho proceso de restauración.

1.3 Organización del documento

Este documento está presentado de la siguiente forma. En el Capítulo 2 se presenta un compendio de los conceptos fundamentales de los sistemas de distribución, generadores distribuidos, cargas especiales, topología y criterios técnicos de operación. En el capítulo 3 se describe la metodología utilizada para solucionar el problema de la restauración y se presenta el algoritmo computacional. En el capítulo 4 se realiza el análisis de los resultados obtenidos y la comparación de escenarios de restauración con y sin la presencia de GD y cargas especiales. Finalmente, en el capítulo 5 se presentan las conclusiones y trabajos futuros.

Capítulo 2

2.1 Sistemas de distribución

Los sistemas eléctricos están conformados en términos generales por 3 grandes bloques: la generación, la transmisión y, por último, los sistemas de distribución. A este último lo conforman el grupo de elementos que permiten entregar la energía al usuario final; se calcula que 2/3 de toda la inversión que se realiza en el sistema de potencia se dedica a los sistemas de distribución. Adicionalmente la mayor parte de las pérdidas del sistema de potencia se presentan en estos sistemas debido a la gran cantidad de elementos que la conforman, su conexión y a los niveles de tensión en que opera [10].

Los elementos de un sistema de distribución son:

- Subestaciones de distribución: es donde se transforma la energía recibida de las líneas de subtransmisión y dan origen a los circuitos de distribución primarios.
- Circuitos primarios: recorren los sectores urbanos y rurales, y suministran la potencia a los transformadores de distribución a niveles de media tensión, generalmente entre 7620 V y 33 kV.
- Transformadores de distribución: se conectan a un circuito primario y entregan la energía a un circuito secundario.
- Circuito secundario: son los encargados de llevar la energía a los usuarios finales, con tensiones que generalmente son de 120/208 - 120/240 V y hasta 600 V.

Los sistemas de distribución se pueden clasificar según distintos criterios. Dentro de las principales clasificaciones se tienen las siguientes [10]:

- Según el nivel de tensión: se dividen en redes de distribución secundarias y redes de distribución primarias.
- Según su construcción: se dividen en redes aéreas y subterráneas.
- Según su ubicación geográfica: se dividen en redes urbanas y rurales.
- Según el tipo de cargas: se dividen en residenciales, comerciales, industriales, alumbrado público y mixtas.

Los sistemas de distribución pueden tener diversas topologías, las cuales se explican a continuación.

2.1.1 Redes radiales

Es un tipo de red que se caracteriza por contar con una sola trayectoria entre el alimentador y cada una de las cargas. Para abastecer el servicio de energía eléctrica este tipo de red tiene un camino simple sin retorno por el cual circula corriente, donde la energía fluye desde un alimentador y se distribuye por las ramas entre las distintas cargas de la red (ver Figura 2.1).

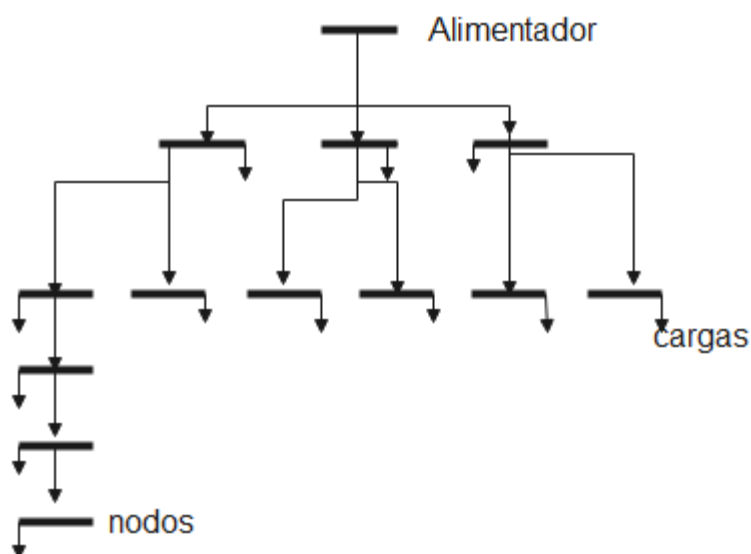


Figura 2.1. Red de distribución radial

Este tipo de sistema es el más simple y el más económico, debido a que es el tipo de red que utiliza menor cantidad de elementos, pero presenta el inconveniente que durante el mantenimiento de los interruptores se debe de dejar fuera de servicio parte de la red. Adicionalmente, son los menos confiables dado que un fallo en cualquier parte de la red deja desconectados todos los nodos aguas abajo del nodo bajo falla. Para resolver este inconveniente presenta líneas de interconexión con interruptores que permanecen abiertos; en caso de emergencia se cierran para pasar parte de la carga entre alimentadores y permitir que se alimenten el resto de nodos mientras se clarifica el fallo.

Los sistemas de distribución radiales generalmente son los más utilizados debido a su diseño con pocos componentes, y por ende su bajo costo de instalación y mantenimiento.

Adicionalmente, en estas redes es más fácil localizar y aislar un fallo, aunque pueden llegar a tener problemas de continuidad de servicio.

2.1.2 Redes en anillo

En este sistema se cuenta con más de una trayectoria entre los alimentadores y las cargas para proporcionar el fluido eléctrico. En este sistema la potencia fluye desde la subestación y hace un ciclo completo por toda el área a abastecer y regresa a la subestación. Por lo tanto, las cargas pueden ser abastecidos por varios alimentadores, permitiendo aislar ciertas zonas en caso de alguna contingencia. En general, presenta mejores índices de continuidad del servicio y de regulación de tensión que la del sistema radial. Regularmente, el sistema en anillo tiene un mayor costo inicial y presenta más problemas de crecimiento (ver Figura 2.2).

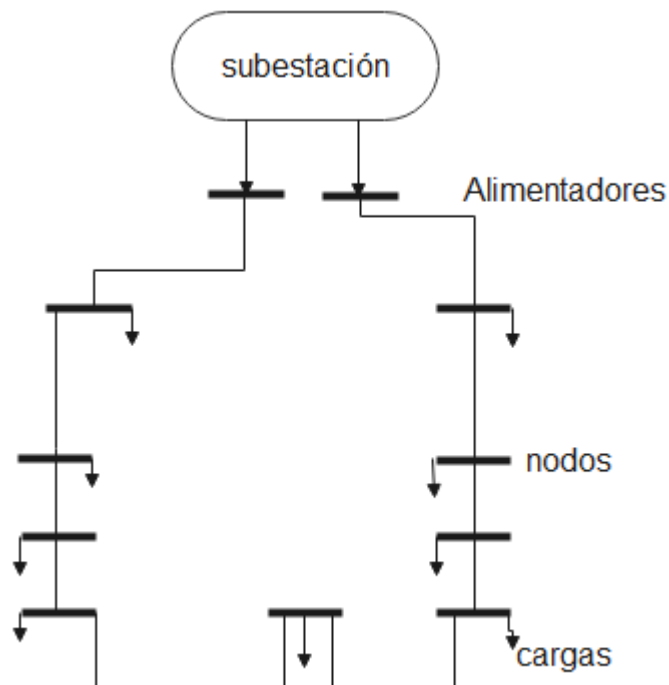


Figura 2.2. Red de distribución en anillo

2.2 Cargas especiales

Son cargas que debido al uso puntual que dichos usuarios dan a la energía, son muy sensibles al presentarse alguna interrupción corta en el suministro de energía eléctrica, dado que pueden

presentarse importantes perjuicios al consumidor (riesgo de muerte, daños en procesos de producción en masa, daños a equipos de alto costo como lo son máquinas controladas por sistemas electrónicos, centros hospitalarios, sistemas masivos de transporte, almacenaje de productos e insumos delicados que requieren refrigeración extrema, entre otros). A pesar de que estas cargas deben contar con sistemas de respaldo de alimentación (plantas de emergencia), es responsabilidad del OR brindar altos índices de confiabilidad para este tipo de usuarios.

2.3 Generación distribuida

La generación distribuida es la generación de energía eléctrica mediante pequeñas fuentes de generación, instaladas cerca del consumidor y que se conectan a la red de distribución de energía eléctrica. La presencia de GD reduce pérdidas en la red y ayuda a amortiguar un poco la carga de la red de transmisión, al contar con la presencia de una buena cantidad de pequeñas fuentes de generación repartidas por el sistema eléctrico. El fallo de una de las fuentes no supone un grave problema para el sistema de distribución; por ende, mejoran los índices de confiabilidad, calidad y seguridad del sistema eléctrico. En la generación distribuida presentan una gran participación las energías renovables, lo que reduce las emisiones de CO₂ y se establece como una parte fundamental en el desarrollo de las *Smart Cities*.

Capítulo 3

Los sistemas de distribución operan generalmente de forma radial, por lo que es característico en estas redes que el flujo de potencia tome un único camino desde la fuente hasta cada uno de los nodos de carga (ver Figura 3.1). Debido a esta característica, al momento de presentarse una falla, todos los nodos que se encuentren aguas abajo del lugar de ocurrencia de la contingencia quedan sin el suministro de energía eléctrica.

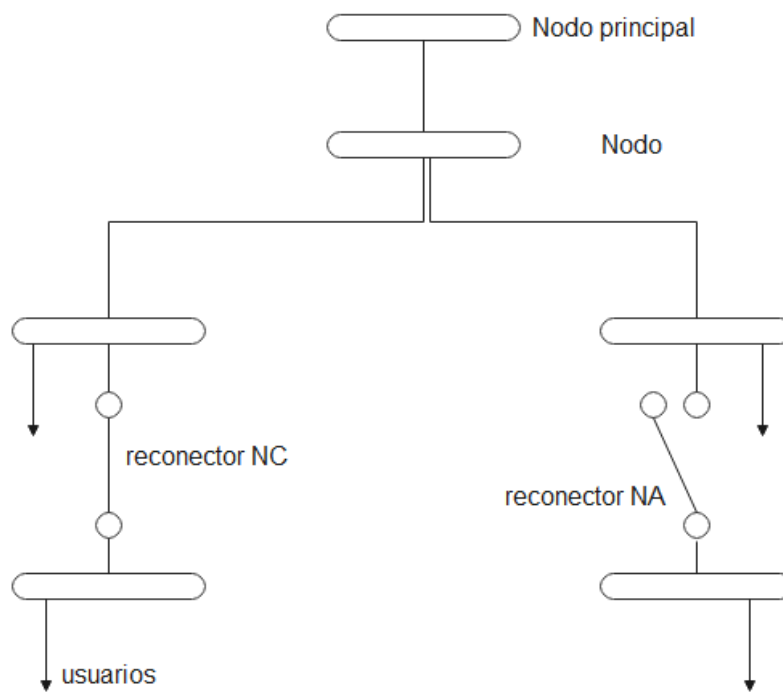


Figura 3.1. Red radial con reconectores normalmente cerrados (NC) y abiertos (NA)

Es menester de las empresas prestadoras de servicio de energía eléctrica cumplir con los índices de confiabilidad que garantizan altos niveles de calidad del servicio. Por ende se presenta un marcado interés en el desarrollo de técnicas que permitan aislar la contingencia por medio de equipos de protecciones, para luego proceder a reestablecer el suministro a los nodos y usuarios que quedaron desconectados luego de presentarse el fallo. El proceso de reconectar dichas cargas se puede modelar como un problema combinatorial de compleja solución, donde distintas

técnicas exactas pueden ser utilizadas para dar solución a este problema garantizando la solución óptima global, pero que requieren tiempos de cómputo grandes, los cuales pueden ser razonablemente reducidos con la aplicación de técnicas heurísticas o metaheurísticas que encuentran soluciones de muy buena calidad, con tiempos de cómputo relativamente cortos.

La penetración de GD conectados directamente a la red de distribución, introducen un mayor nivel de confiabilidad al sistema debido a que disminuyen en cierta medida la dependencia de la red principal para operar durante una contingencia. Por otra parte, la presencia de cargas especiales de prioritaria reconexión a la red, introducen un cierto grado de complejidad adicional al proceso de restauración.

3.1. Técnica heurística

Las técnicas heurísticas son algoritmos para solucionar problemas combinatoriales complejos. Un algoritmo heurístico es una metodología de búsqueda que utiliza un conjunto de procedimientos simples, en ocasiones basados en el sentido común, que logran generar soluciones de muy buena calidad de manera simple y rápida. Son de fácil implementación, sin embargo, no garantizan encontrar la solución óptima global del problema.

Las técnicas heurísticas se caracterizan por pasar de una solución parcial a otra, usando índices de sensibilidad, hasta lograr una solución satisfactoria que generalmente es una muy buena solución, pero que frecuentemente no es la solución óptima global [11].

3.2. Flujo de potencia

El flujo de potencia es una herramienta analítica que permite conocer el estado operativo de una red eléctrica, calcular las tensiones nodales, corrientes por las líneas y flujos de potencia activa y reactiva. Existen diversos métodos de flujo de carga empleados en redes eléctricas. En este proyecto se emplea el método de Newton Raphson.

Este método se basa en la expansión en series de Taylor de una o varias variables [12]. Debido a sus características de convergencia, este método es muy aplicado en la academia. La convergencia cuadrática hace que sea matemáticamente superior comparado con otros métodos de solución como son el Gauss-Seidel, lo que lo hace tener más eficiencia de cálculo. Además, el tamaño de la red no afecta el número de iteraciones necesarias para que se alcance una solución aceptable. Sin embargo, este método tiene que invertir la matriz Jacobiana en cada

iteración, lo que afecta el tiempo de cálculo. Para mayor información, el lector se puede remitir a [12].

3.3. Metodología propuesta

El uso de los reconectores en las redes distribución permite mediante sencillos procedimientos de apertura y cierre, el aislamiento de zonas bajo falla, y, de forma paralela, realizar la restauración de cargas desconectadas, las cuales pueden ser transferidas hacia alimentadores vecinos o reconectados al mismo alimentador, modificándose la topología de la red.

El centro de control garantiza el buen funcionamiento del sistema vigilando las variables de estado de la red; de igual forma monitorean el estado de las cargas normales y especiales conectadas al sistema. El objetivo de la restauración es ingresar nuevamente al sistema la mayor cantidad de carga en el menor tiempo posible, por lo que se deben analizar gran cantidad de posibles configuraciones de red, buscando minimizar la cantidad de energía no servida y priorizando la restauración de las cargas especiales si las posee, mediante la apertura y cierre de los dispositivos de protección o maniobra. El crecimiento natural de los sistemas de distribución, la introducción de GD y las cargas especiales, han hecho que este problema sea complejo, haciendo necesario estudiar metodologías que permitan dar solución al problema de la restauración de manera eficiente. Cabe mencionar que las soluciones son de tipo temporal dado que una vez clarificada la contingencia, el sistema debe retornar a su configuración y estado normal de operación.

A continuación, se presenta una metodología que permite solucionar el problema de la restauración del servicio utilizando dispositivos automáticos de protección, mediante técnicas heurísticas basadas en teoría de grafos.

3.3.1. Aislamiento de falla e identificación de los elementos desconectados

El primer paso de la metodología descrita consiste en aislar la contingencia e identificar los elementos que quedaron desconectados luego del fallo. Se parte de una red de distribución en estado normal de operación, como se muestra en la Figura 3.2. Los datos de este sistema se encuentran en [13].

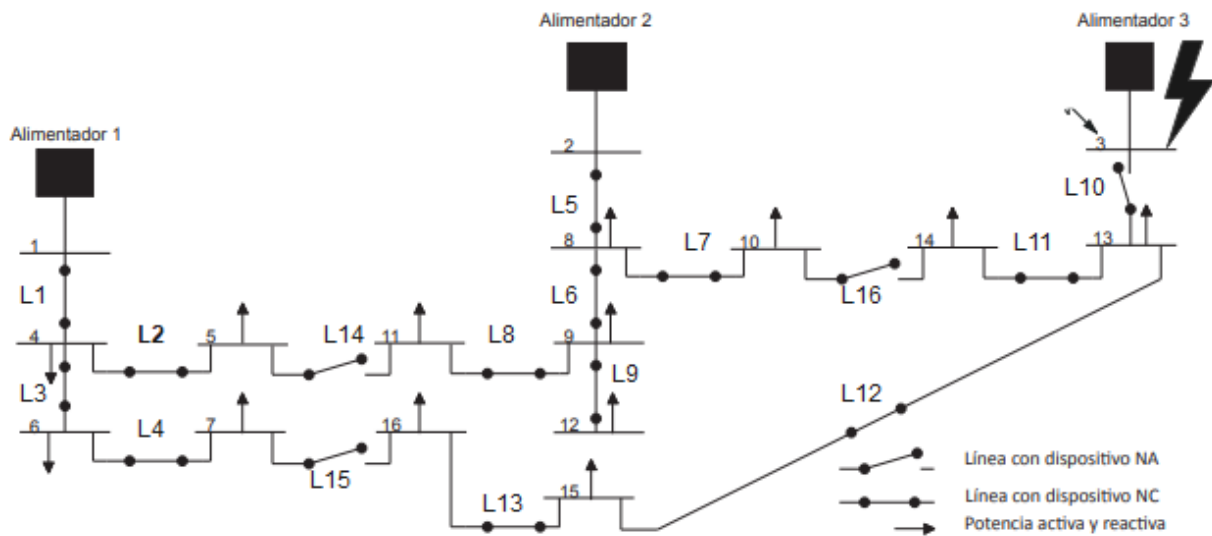


Figura 3.3. Fallo en nodo 3

3.3.3. Criterios de decisión para ordenar las líneas de respaldo candidatas para el proceso de restauración

Una vez se tiene el listado de nodos a restaurar y las líneas de respaldo candidatas, se procede a determinar cuál de las opciones es la más viable, para lo cual se verifica la presencia de cargas especiales dentro del listado de nodos desconectados. Dichas cargas deben ser priorizadas en el proceso de restauración, por lo que en caso de contar con este tipo de cargas se evalúa el área de demanda hasta la carga especial asociada a cada línea candidata; luego, se evalúa la capacidad de corriente asociada a cada una de las líneas candidatas a conectar.

Para realizar este procedimiento, primero se debe ejecutar un flujo de carga utilizando el método de Newton-Raphson a la red resultante luego de retirar todos los elementos desconectados después del fallo (ver Figura 3.4).

- **Área de demanda asociada a cargas especiales**

Cuando uno de los nodos desconectados luego de la contingencia es una carga especial, se debe priorizar dicha carga en el proceso de restauración, para lo cual se define el concepto de área de demanda como la sumatoria de las demandas desde el nodo especial hasta el nodo candidato a recibir carga asociado a cada línea de respaldo (ver Figura 3.5); la solución más viable es aquella

cuya área de demanda sea menor, dado que esta es la que menos sobrecarga colocaría al alimentador correspondiente antes de conectar la carga especial.

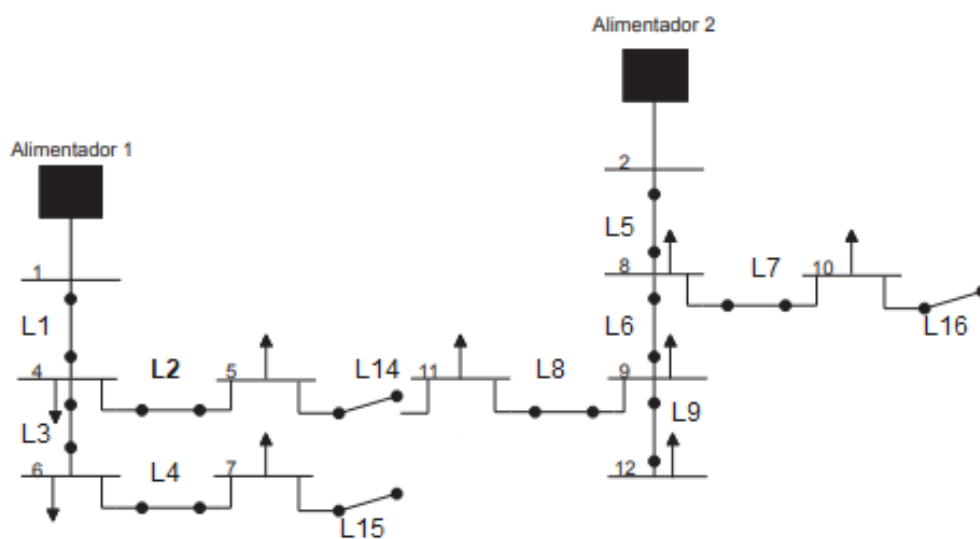


Figura 3.4 Red después del fallo

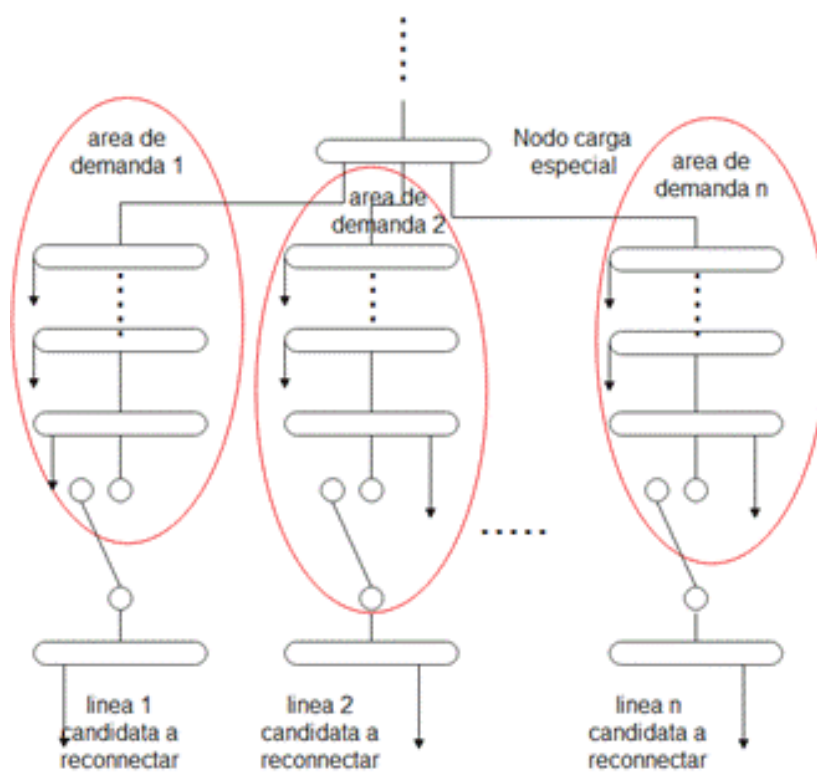


Figura 3.5. Áreas de demanda para cargas especiales

En el ejemplo de la Figura 3.3 se tienen dos líneas candidatas para el proceso de restauración de (L15 y L16); suponiendo que la carga del nodo 13 es una carga especial, se calculan las demandas de área asociadas a cada una de estas líneas como la suma de las demandas de todos los nodos, desde el nodo especial hasta el nodo candidato a recibir carga (ver Figura 3.6).

Considerando las demandas del sistema de prueba, se tiene que el área de demanda A15 tiene un valor de 4.95 MV y el área de demanda A16 2.84 MVA. Como el objetivo es garantizar la restauración de la carga del nodo 13, se selecciona la línea candidata con menor área de demanda, que para este caso es el área A16. De esta forma, el nodo 14 es seleccionado para recibir carga e iniciar el proceso de restauración, por medio de la línea L16.

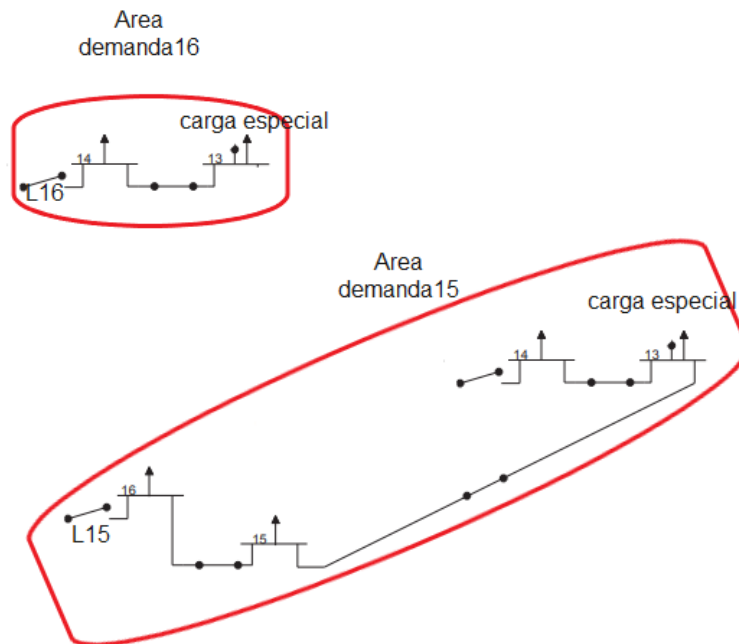


figura 3.6 Áreas de demanda

Figura 3.6. Áreas de demanda

- **Capacidad de corriente de líneas de recorrido**

Para organizar las líneas candidatas a reconectar con base a la reserva de corriente en un tramo de red específico, se utilizan los resultados del flujo de carga realizados previamente. Debido a la característica radial de las redes de distribución, se puede identificar un camino desde los nodos correspondientes a cada línea de respaldo hasta el nodo slack y se calcula el delta de

corriente para cada línea del recorrido (ver Figura 3.7). El delta de corriente se calcula como la diferencia entre la corriente máxima de cargabilidad de la línea y la corriente que se fluye por dicha línea obtenida a partir del flujo de carga. Este proceso se repite para todas las líneas de respaldo candidatas y se organizan con respecto al delta de corriente asociado de forma descendente.

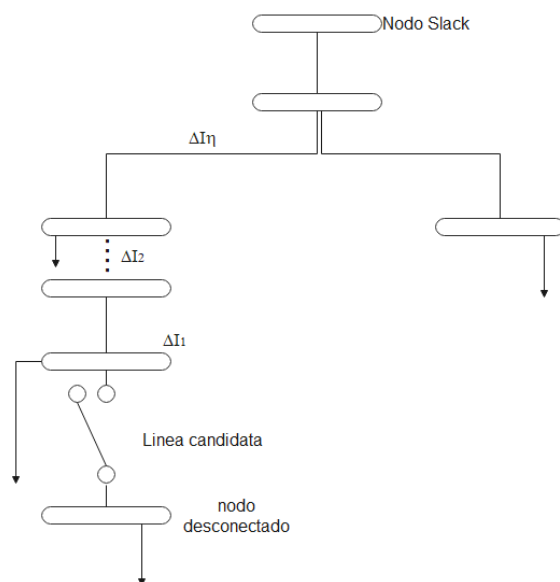


Figura 3.7. Capacidad de corriente

Para el caso del ejemplo, se obtiene para las dos líneas candidatas (L15 y L16), los deltas de corriente de las líneas desde los nodos 7 y 10 respectivamente hasta sus correspondientes nodos slack, como muestra la Figura 3.8. En este caso, los deltas para L15 son 296.3 A, 280.8 A y 228.1 A para ΔI_4 , ΔI_3 y ΔI_1 , respectivamente. Para L16, los deltas son 301.8 A y 162.5 A para ΔI_7 y ΔI_5 respectivamente.

Posteriormente, se obtiene el menor ΔI para cada línea candidata; dado que este valor representa la máxima cargabilidad con la que puede operar cada una de las opciones, la L15 lo máximo que se podría sobrecargar sería con 228,13 A y L16 con 162,57 A. por consiguiente, la línea que más se podría cargar sería L15 y luego L16.

En caso de que la red no presente ninguna carga especial, la línea seleccionada para iniciar el proceso de restauración sería L15.

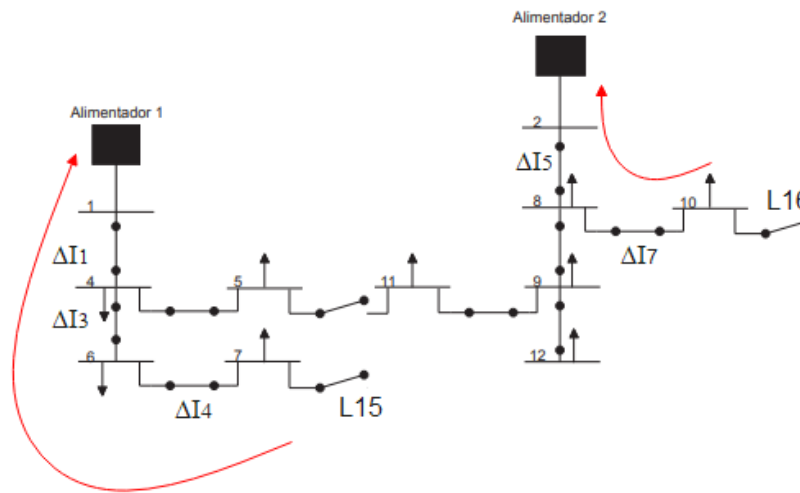


Figura 3.8. Deltas de corriente asociados a cada posible línea de restauración

3.3.4. Restauración

Teniendo aislada la falla, definidos los nodos a restaurar y el orden a conectar las líneas de respaldo, se procede a iniciar el proceso de restauración de los nodos desconectados. Se verifican las condiciones técnicas de operación resultantes al conectar el primer nodo de carga, cambiado a estado cerrado el reconector de la línea de respaldo seleccionada; luego, se realiza un flujo de potencia y se verifica que no se viole ninguno de los límites técnicos de operación.

Sin embargo, durante el estado de emergencia el sistema puede operar en condiciones técnicas un poco más flexibles a las exigidas en estado normal de operación. En este proyecto se trabaja bajo estados de restauración una regulación de tensión del 15%, una cargabilidad de los conductores del 90% y una topología enmallada.

Verificando que en esta nueva configuración la regulación de tensión en cada uno de sus nodos este por debajo del 15% y que la corriente que fluye por cada una de las líneas no supere el 90% de la cargabilidad máxima de la línea, se puede restaurar el nodo, por lo que se energiza nuevamente y se repite el procedimiento con los nodos adyacentes. Dicho procedimiento se realiza hasta que la totalidad de los nodos sean restaurados o se alcance la máxima cargabilidad permitida para la línea de respaldo; paso seguido se evalúa la siguiente línea de respaldo candidata para restauración y se sigue con el proceso de restauración nodo a nodo. Esto se repite hasta que se terminen las líneas de respaldo candidatas para restauración.

A continuación, se presenta paso a paso el procedimiento descrito para el ejemplo de la Figura 3.2.

Inicialmente, se definen las líneas de respaldo candidatas para el proceso de restauración (L15 y L16) y los nodos candidatos a recibir carga (14 y 16, respectivamente). Luego, se cierra el reconectador de L16, se ejecuta un flujo de potencia y se obtienen las variables de operación del sistema. Para este caso, el nodo que presenta menor tensión es 12 (0.969 pu) y la línea más cargada es L5 con 160.19 A, muy por debajo del límite de cargabilidad del 90% de su capacidad nominal (90% de 315 A = 283.5 A). Por consiguiente, se procede a reconectar el siguiente nodo (nodo 13), pasando a estado cerrado el reconectador de la línea L11.

Después de reconectar el nodo 13 se realiza el flujo de carga y se encuentra que la menor tensión es 0.968 pu en el nodo 11 y la línea más cargada es L5 con 171.76 A. Luego, se reconecta el siguiente nodo 15 y finalmente el nodo 16, como se muestra en la Figura 3.9.

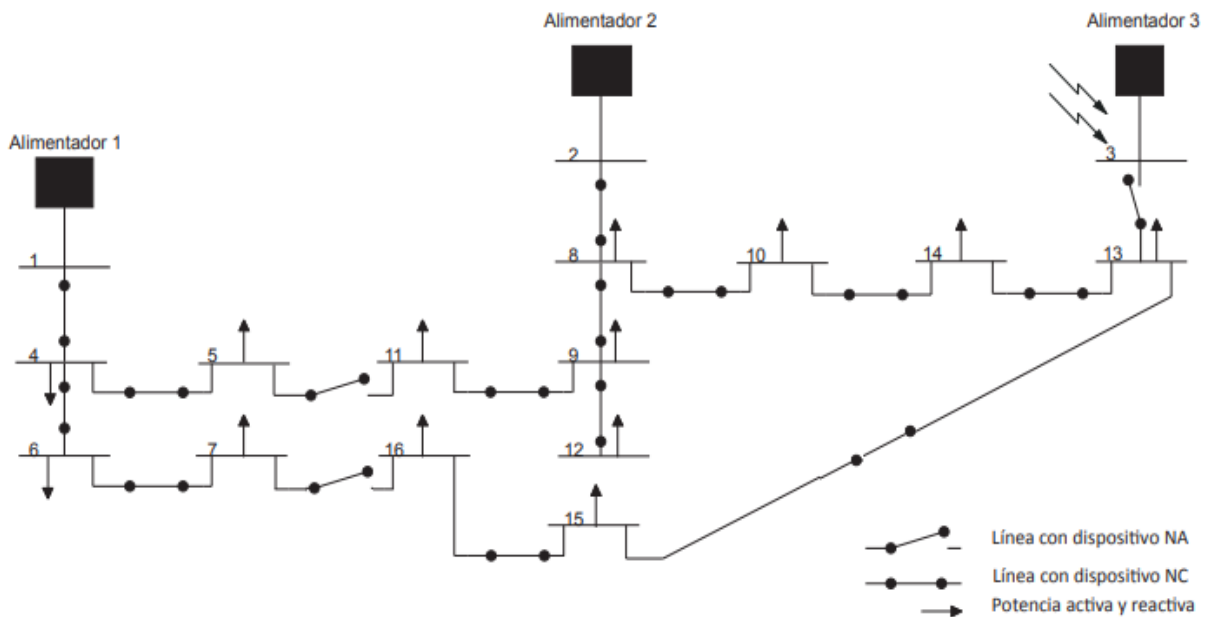


Figura 3.9. Red totalmente restaurada

Es preciso aclarar que, si la cargabilidad de alguna de las líneas hubiera llegado al valor máximo permitido, dicha carga no debe conectarse a la red y el reconectador de la línea en evaluación debe continuar en estado abierto y pasar a verificar la siguiente línea de respaldo candidata para restauración. En la Figura 3.10 se presenta el diagrama de flujo correspondiente a la metodología de solución propuesta.

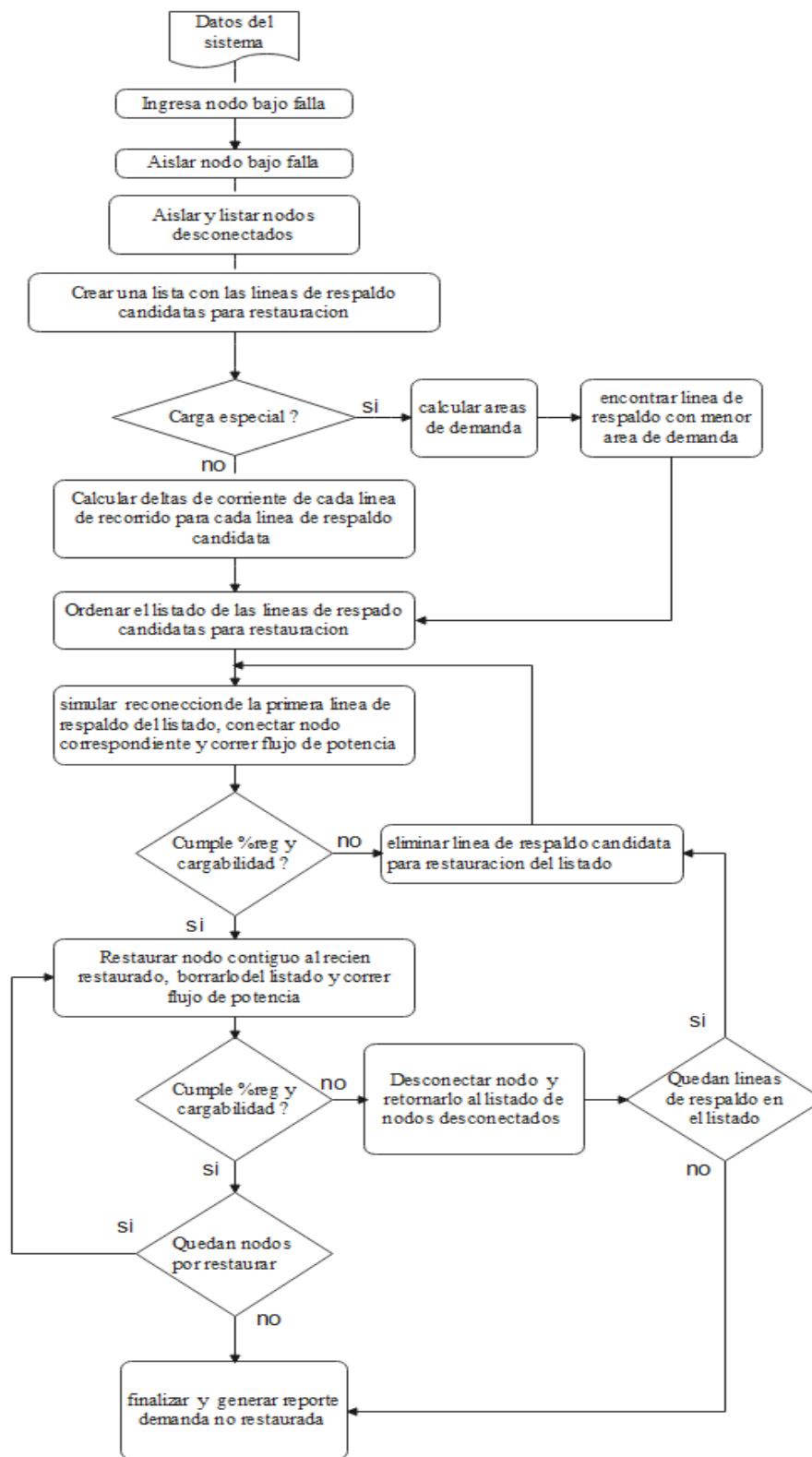


Figura 3.10. Diagrama de flujo de la metodología propuesta

Capítulo 4

Aplicación y resultados

En este capítulo se aplica la metodología propuesta en el Capítulo 3, para lo cual se emplea el sistema IEEE de 69 nodos, el cual es modificado y además se incluye GD. Los datos de este sistema pueden encontrarse en [7]. El algoritmo computacional se implementó en Matlab y se empleó Matpower como flujo de carga.

El sistema de prueba de la Figura 4.1 consta de tres alimentadores, donde se asume que todas las líneas tienen dispositivos de apertura y cierre. Adicionalmente, tiene 4 GD ubicados en los nodos 21, 33, 46 y 62 con capacidades de generación de 300, 100, 200 y 400 kW, respectivamente. El sistema opera a 12.66 kV y la potencia base es 100 MVA. Para las simulaciones, los GD se operan con los siguientes valores de potencia activa: G1 (nodo 21: 300 kW), GD2, (nodo 33: 59.79 kW), GD3 (nodo 46: 136.3 kW) y GD4 (nodo 62: 400 kW).

Para verificar la metodología propuesta se consideran fallos en dos nodos del sistema: *i*) caso 1 (nodo 36) y *ii*) caso 2 (nodo 1). Para cada caso se consideran cuatro escenarios:

- Escenario 1: sin GD y sin carga especial.
- Escenario 2: sin GD y con carga especial.
- Escenario 3: con GD y sin carga especial.
- Escenario 4: con GD y con carga especial.

4.1 Caso 1 – Falla en el nodo 36

Se recuerda que para este caso se simula una falla en el nodo 36 considerando los cuatro escenarios descritos anteriormente.

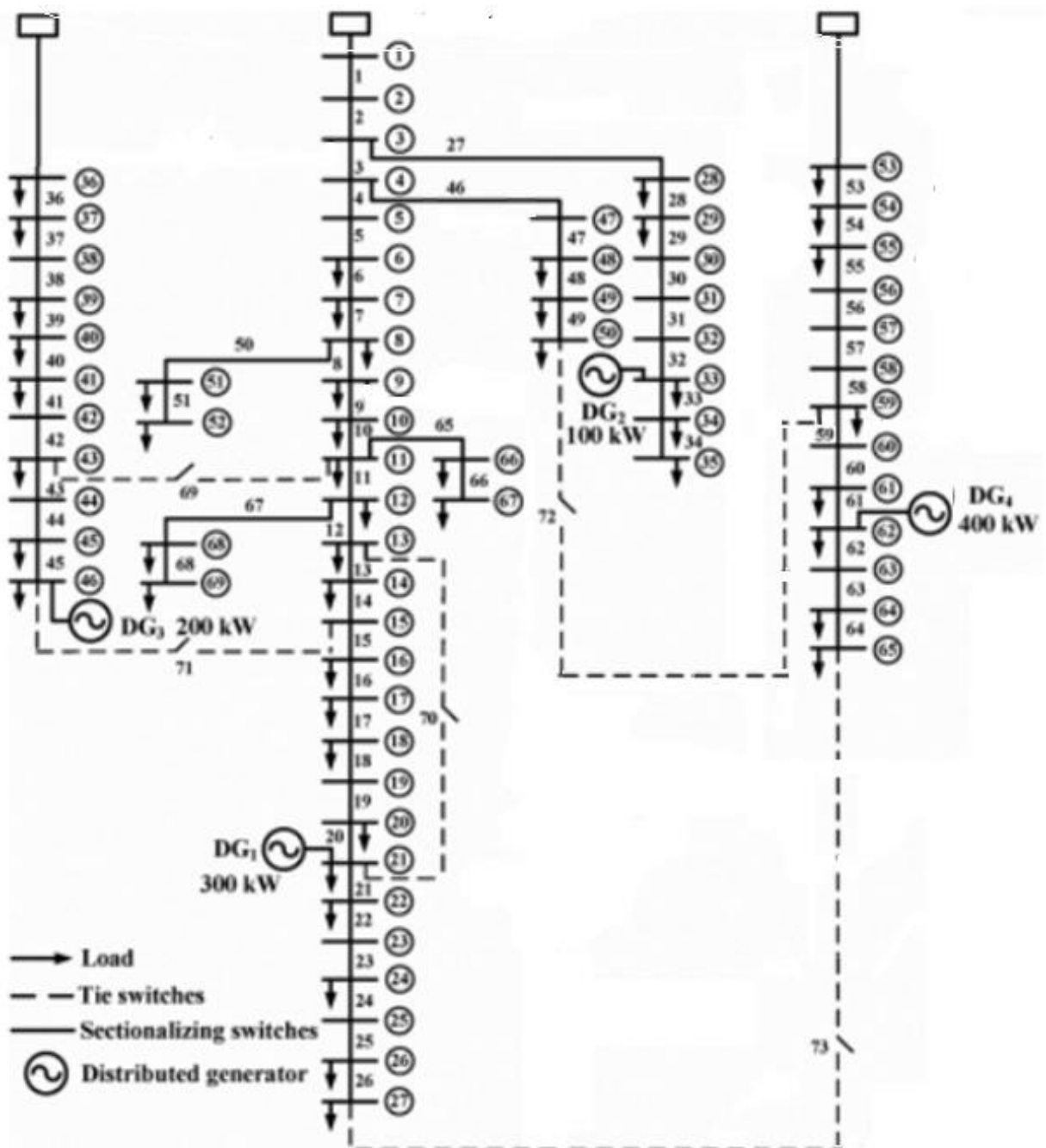


Figura 4.1. Sistema de prueba

4.1.1 Escenario 1

Se considera que los 4 GD están desconectados y que todas las cargas son de tipo general (no existen cargas especiales). La corriente nominal de los conductores es 205 A, por lo que el límite máximo de cargabilidad es 184.5 A (90% de I_{nom}).

Después de aplicar la metodología se encuentra una solución de restauración parcial, ya que de los 10 nodos que quedan por fuera de funcionamiento cuando se presenta la falla, solamente 8 nodos logran ser restaurados, quedando 2 sin suministro de energía; esto se debe a que se viola la restricción de cargabilidad de la línea 1. La mayor caída de tensión se presentó en el nodo 65 con 5.72% y la línea con mayor cantidad de corriente es la línea 1 con 184.32 A.

De acuerdo a lo anterior:

- Nodos restaurados: 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43 y 44.
- Potencia restaurada: 0.678 MVA.
- Nodos sin suministro de energía: 45 y 46.
- Potencia no restaurada: 1.264 MVA.
- Línea de respaldo conectada: 69.

En la Figura 4.2 se presenta el sistema restaurado.

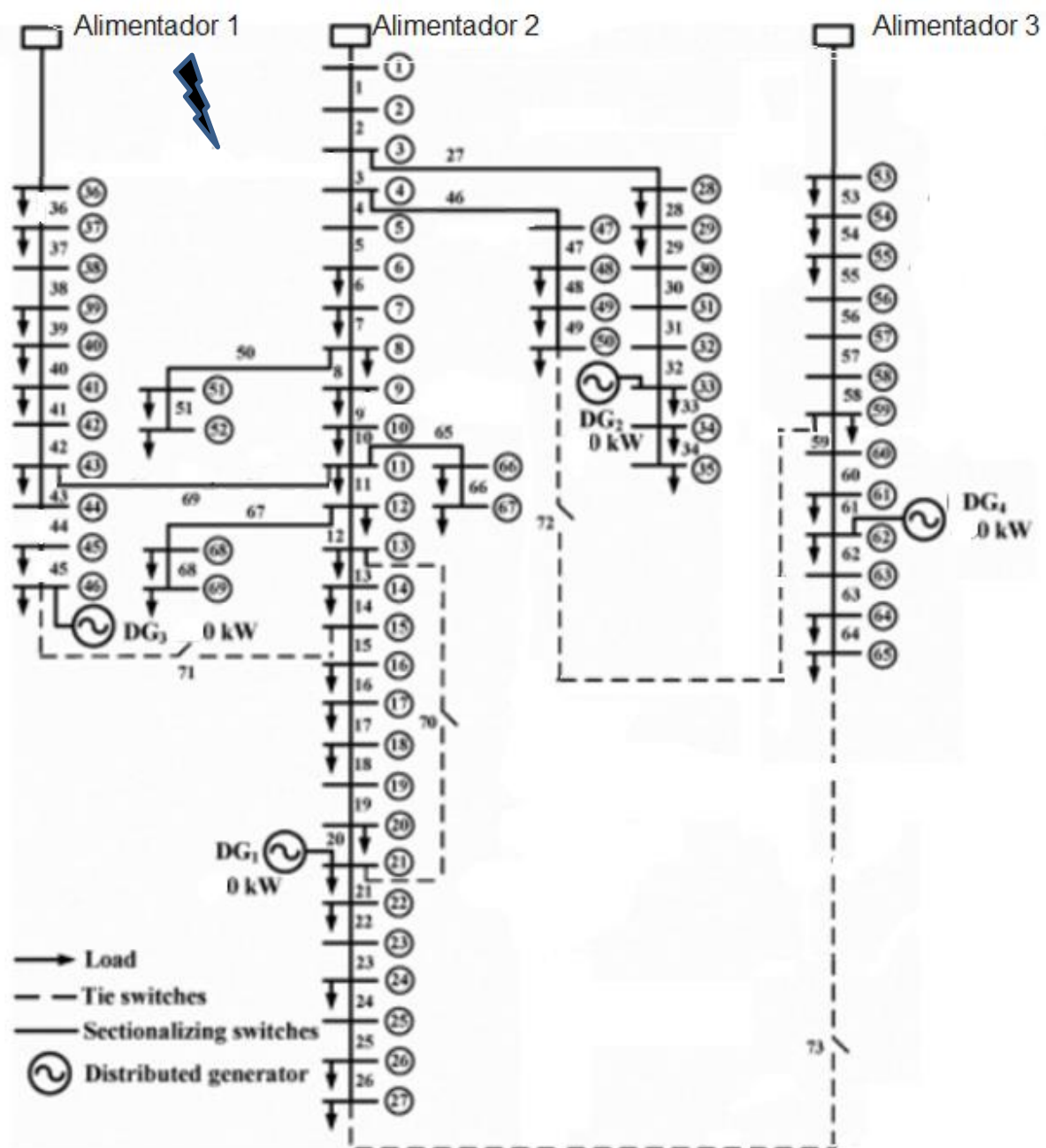


Figura 4.2. Sistema de prueba restaurado – Caso 1, Escenario 1

4.1.2 Escenario 2

Se considera que los 4 GD están desconectados y que todas las cargas son de tipo general, a excepción del nodo 45 que se considera una carga especial o prioritaria. La corriente nominal de los conductores es 205 A, por lo que el límite máximo de cargabilidad es 184.5 A (90% de I_{nom}).

Después de aplicar la metodología se encuentra una solución de restauración parcial, ya que de los 10 nodos que quedan por fuera de funcionamiento cuando se presenta la falla, solamente 5 nodos logran ser restaurados, quedando 5 sin suministro de energía; esto se debe a que se viola la restricción de cargabilidad de la línea 1. La mayor caída de tensión se presentó en el nodo 65 con 5.7% y la línea con mayor cantidad de corriente es la línea 1 con 184.32 A.

De acuerdo a lo anterior:

- Nodos restaurados: 42, 43, 44, 45 y 46.
- Potencia restaurada: 0.699 MVA.
- Nodos sin suministro de energía: 37, 38, 39, 40 y 41.
- Potencia no restaurada: 1.243 MVA.
- Línea de respaldo conectada: 69.

En la Figura 4.3 se presenta el sistema restaurado.

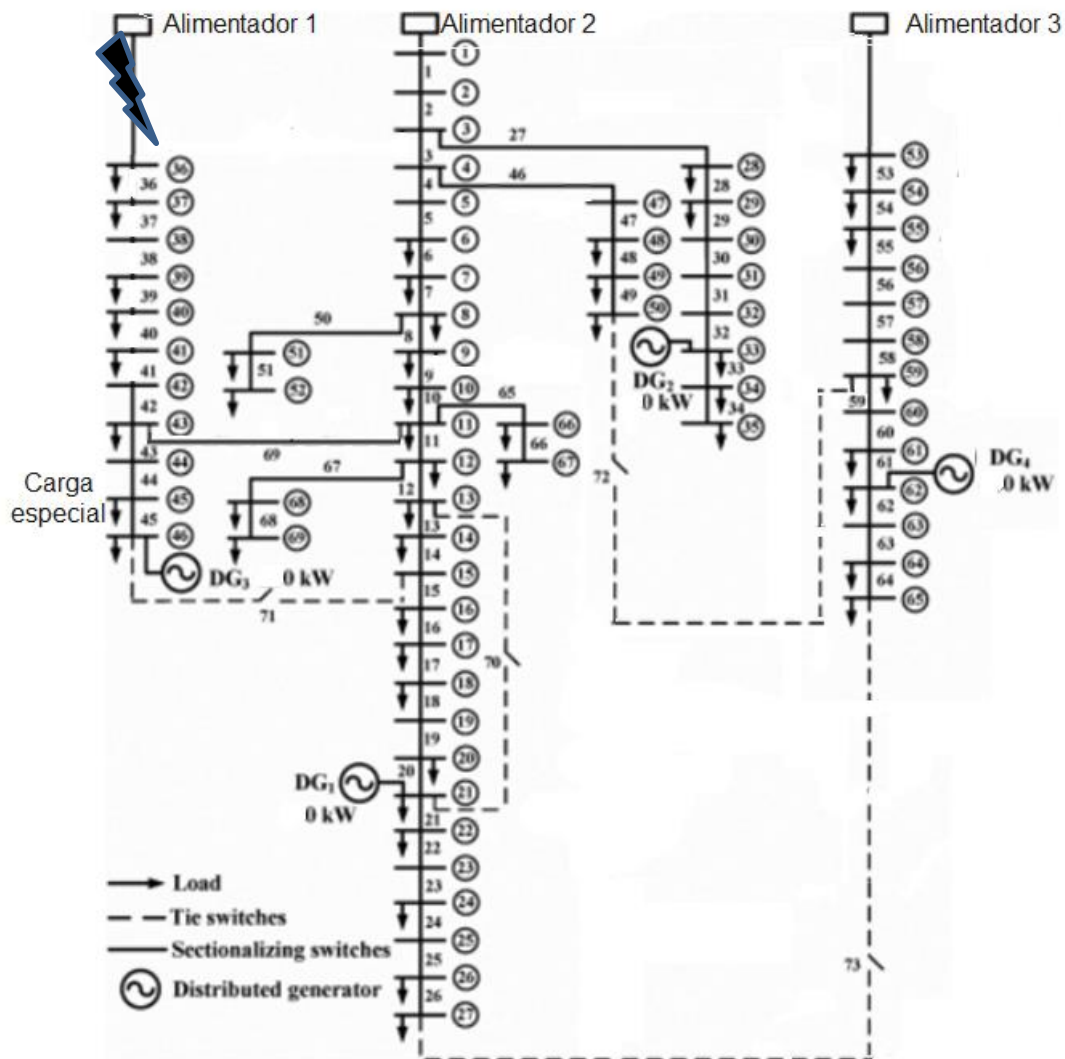


Figura 4.3. Sistema de prueba restaurado – Caso 1, Escenario 2

4.1.3 Escenario 3

Se consideran conectados los 4 GD. Todas las cargas son de tipo general. La corriente nominal de los conductores es 205 A, por lo que el límite máximo de cargabilidad es 184.5 A (90% de I_{nom}).

Después de aplicar la metodología se encuentra una solución de restauración total, ya que son restaurados los 10 nodos que quedan por fuera de funcionamiento cuando se presenta la falla. La mayor caída de tensión se presentó en el nodo 65 con 4.6% y la línea con mayor cantidad de corriente es la línea 1 con 161.62 A.

De acuerdo a lo anterior:

- Nodos restaurados: todos.
- Potencia restaurada: 1.942 MVA.
- Nodos sin suministro de energía: ninguno.
- Potencia no restaurada: 0.0 MVA.
- Línea de respaldo conectada: 69.

En la Figura 4.4 se presenta el sistema restaurado.

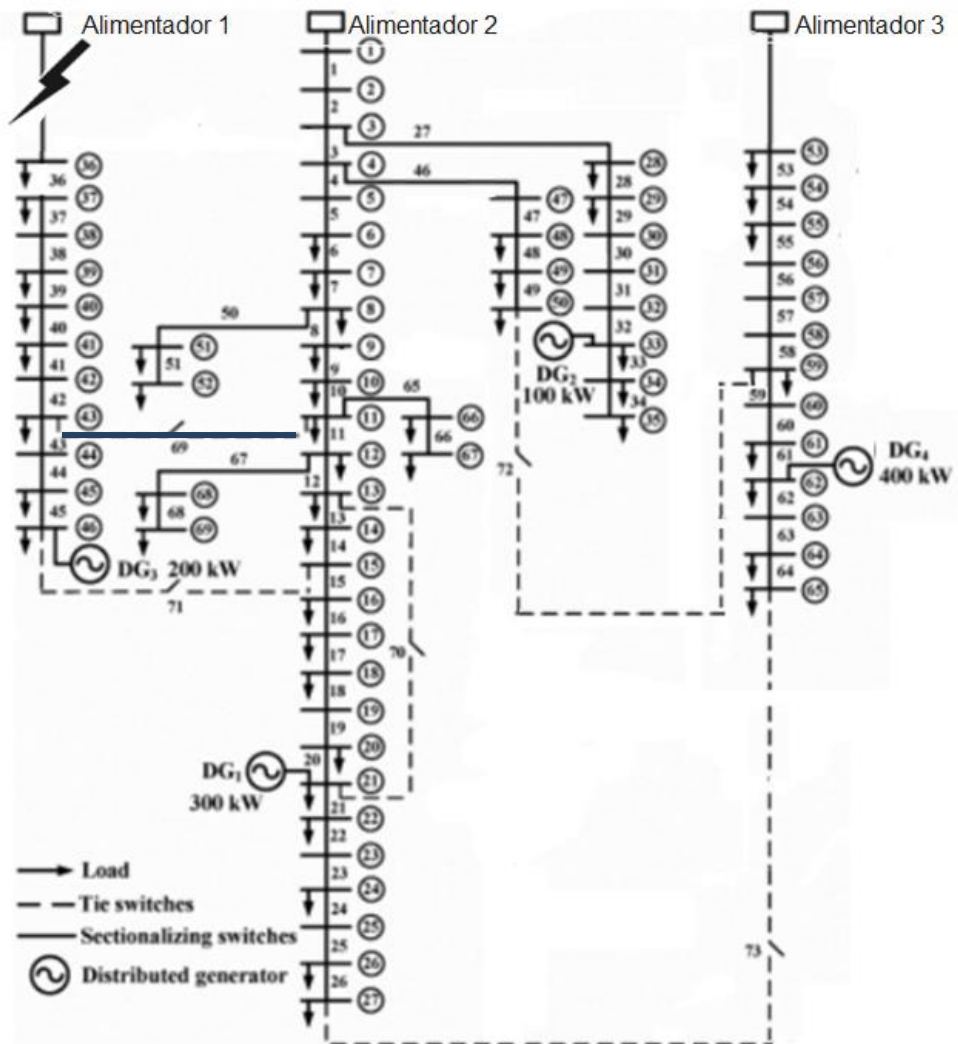


Figura 4.4. Sistema de prueba restaurado – Caso 1, Escenarios 3 y 4

4.1.4 Escenario 4

Se consideran conectados los 4 GD. Todas las cargas son de tipo general, a excepción del nodo 45 que se considera una carga especial o prioritaria. La corriente nominal de los conductores es 205 A, por lo que el límite máximo de cargabilidad es 184.5 A (90% de I_{nom}).

Después de aplicar la metodología se encuentra una solución de restauración total, ya que son restaurados los 10 nodos que quedan por fuera de funcionamiento cuando se presenta la falla. La mayor caída de tensión se presentó en el nodo 65 con 4.6% y la línea con mayor cantidad de corriente es la línea 1 con 161.62 A.

De acuerdo a lo anterior:

- Nodos restaurados: todos.
- Potencia restaurada: 1.942 MVA.
- Nodos sin suministro de energía: ninguno.
- Potencia no restaurada: 0.0 MVA.
- Línea de respaldo conectada: 69.

En la Figura 4.4 se presenta el sistema restaurado.

4.2 Caso 2 – Falla en el nodo 1

Se recuerda que para este caso se simula una falla en el nodo 1 considerando los cuatro escenarios descritos anteriormente.

4.2.1 Escenario 1

Se considera que los 4 GD están desconectados y que todas las cargas son de tipo general (no existen cargas especiales). La corriente nominal de los conductores es 205 A, por lo que el límite máximo de cargabilidad es 184.5 A (90% de I_{nom}).

Después de aplicar la metodología se encuentra una solución de restauración total, ya que son restaurados los 44 nodos que quedan por fuera de funcionamiento cuando se presenta la falla. La mayor caída de tensión se presentó en el nodo 65 con 6.38% y la línea con mayor cantidad de corriente es la línea 53 con 186.49 A.

De acuerdo a lo anterior:

- Nodos restaurados: todos.
- Potencia restaurada: 23.24 MVA.
- Nodos sin suministro de energía: ninguno.
- Potencia no restaurada: 0.0 MVA.
- Líneas de respaldo conectadas: 69 y 72.

En la Figura 4.5 se presenta el sistema restaurado.

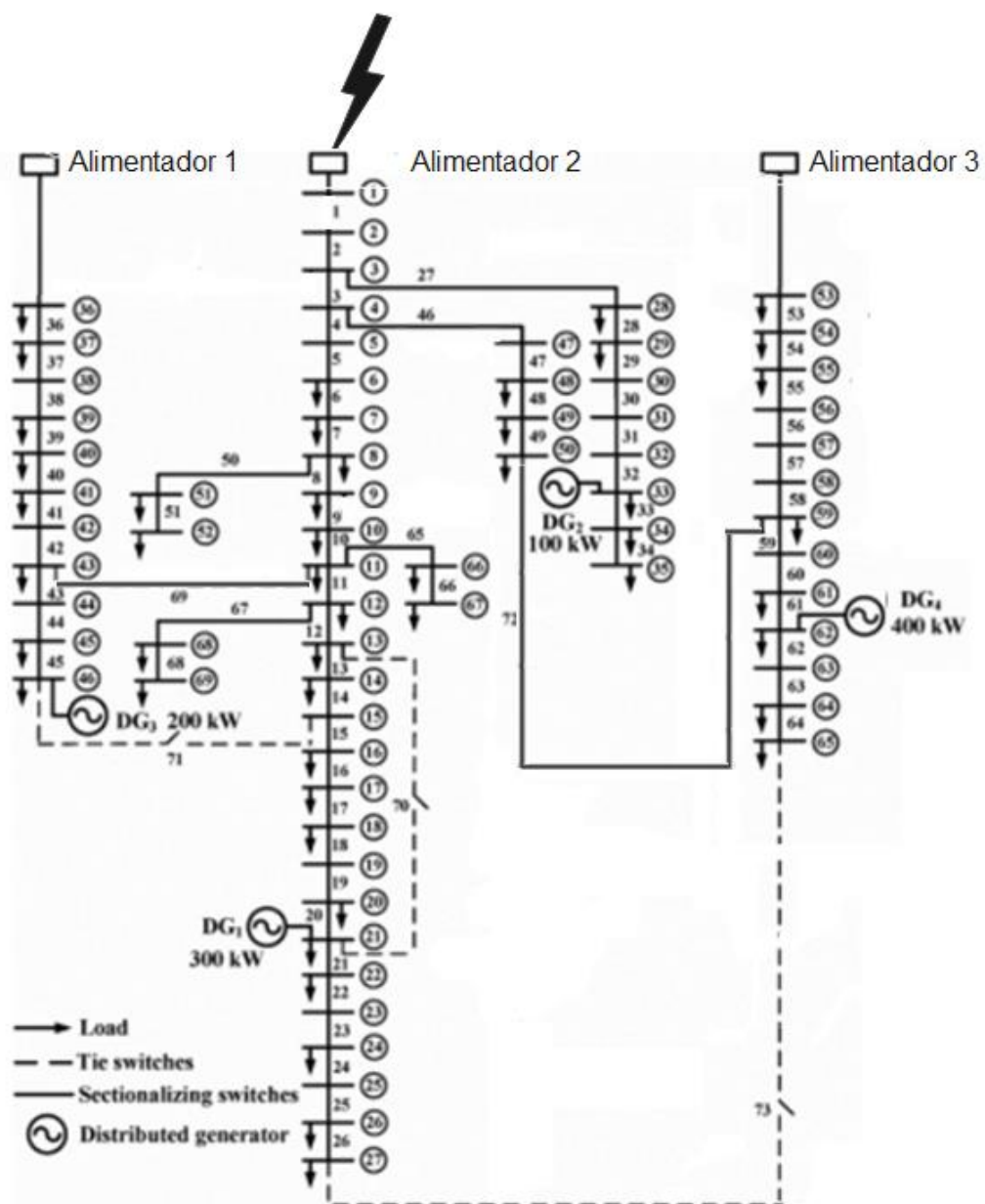


Figura 4.5. Sistema de prueba restaurado – Caso 2, Escenario 1

4.2.2 Escenario 2

Se considera que los 4 GD están desconectados y que todas las cargas son de tipo general, a excepción del nodo 26 que se considera una carga especial o prioritaria. La corriente nominal de los conductores es 205 A, por lo que el límite máximo de cargabilidad es 184.5 A (90% de I_{nom}).

Después de aplicar la metodología se encuentra una solución de restauración parcial, ya que de los 44 nodos que quedan por fuera de funcionamiento cuando se presenta la falla, solamente 36 nodos logran ser restaurados, quedando 8 sin suministro de energía. La mayor caída de tensión se presentó en el nodo 49 con 8.15% y la línea con mayor cantidad de corriente es la línea 36 con 171.46 A.

De acuerdo a lo anterior:

- Nodos restaurados: 20 al 27, 15 al 35 y 47 al 49.
- Potencia restaurada: 16.85 MVA.
- Nodos sin suministro de energía: 1, 50, 51, 52, 66, 67, 68 y 69.
- Potencia no restaurada: 6.39 MVA.
- Líneas de respaldo conectadas: 71 y 73.

En la Figura 4.6 se presenta el sistema restaurado.

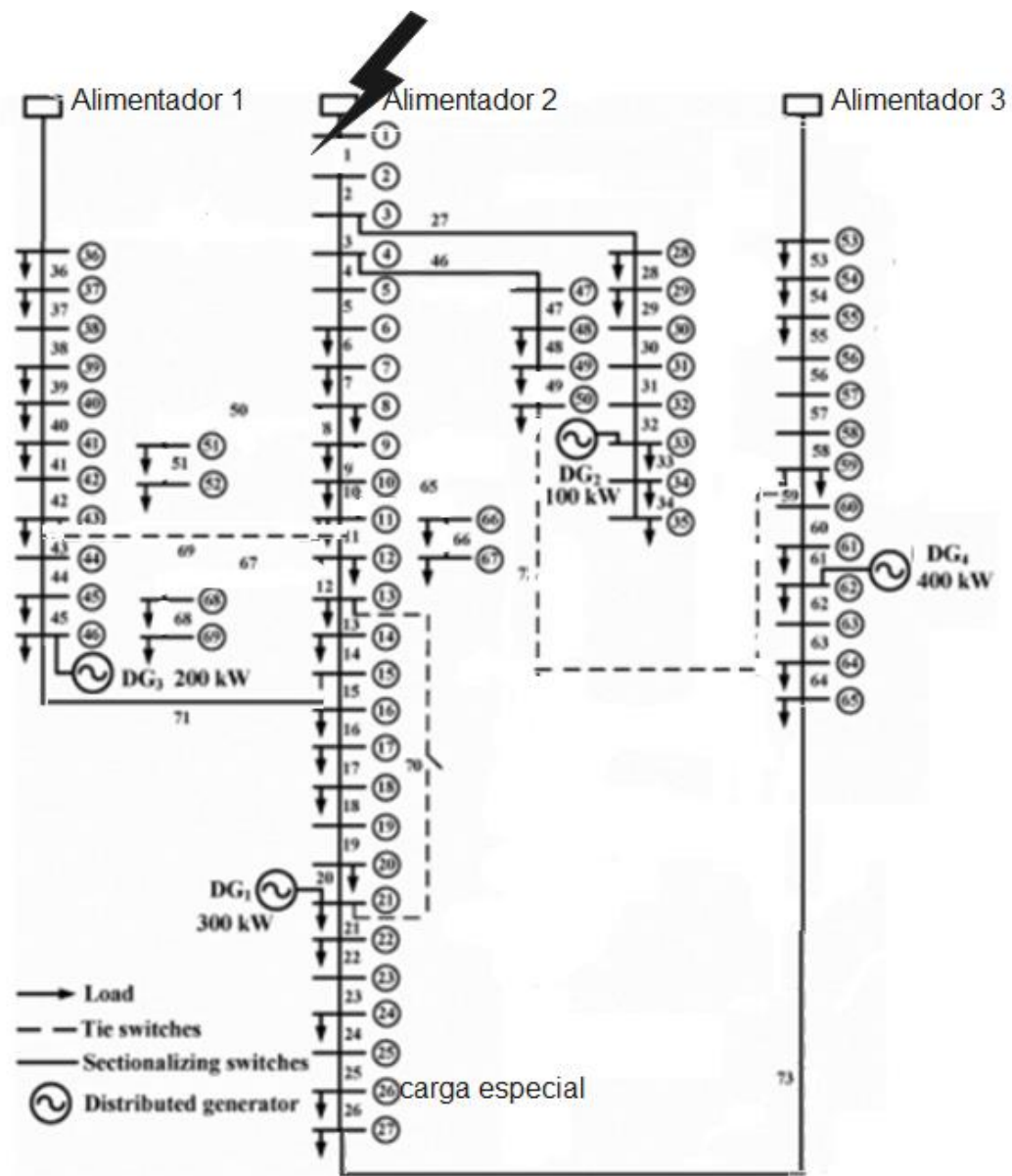


Figura 4.6. Sistema de prueba restaurado – Caso 2, Escenario 2

4.2.3 Escenario 3

Se consideran conectados los 4 GD. Todas las cargas son de tipo general. La corriente nominal de los conductores es 205 A, por lo que el límite máximo de cargabilidad es 184.5 A (90% de I_{nom}).

Después de aplicar la metodología se encuentra una solución de restauración total, ya que son restaurados los 44 nodos que quedan por fuera de funcionamiento cuando se presenta la falla. La mayor caída de tensión se presentó en el nodo 50 con 5.33% y la línea con mayor cantidad de corriente es la línea 36 con 167.7 A.

De acuerdo a lo anterior:

- Nodos restaurados: todos.
- Potencia restaurada: 23.24 MVA.
- Nodos sin suministro de energía: ninguno.
- Potencia no restaurada: 0.0 MVA.
- Línea de respaldo conectada: 69.

En la Figura 4.7 se presenta el sistema restaurado.

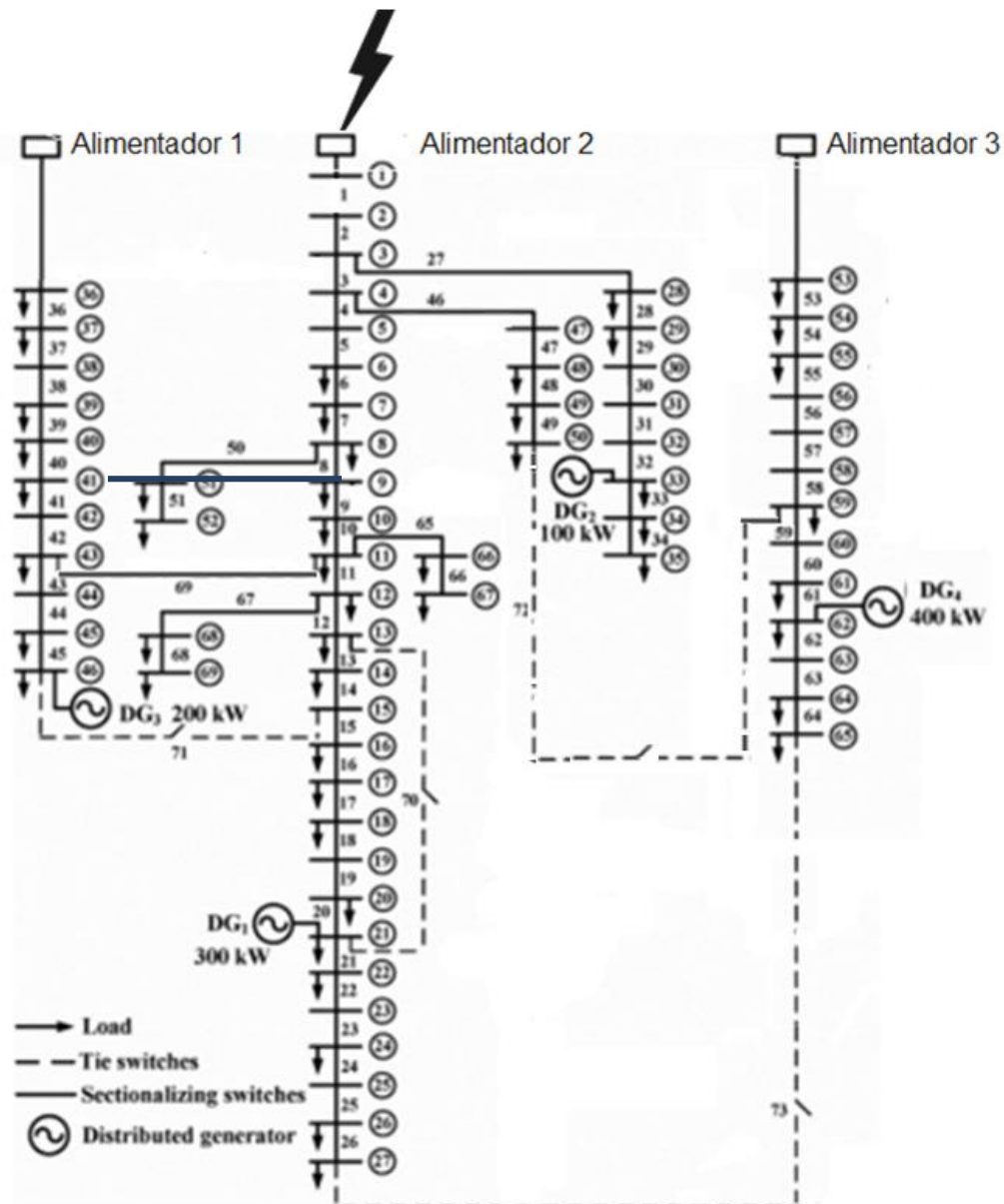


figura 4.8 sistema de prueba restaurado fallo nodo 1 red con GD y sin carga especial

Figura 4.7. Sistema de prueba restaurado – Caso 2, Escenario 3

4.2.4 Escenario 4

Se consideran conectados los 4 GD. Todas las cargas son de tipo general, a excepción del nodo 26 que se considera una carga especial o prioritaria. La corriente nominal de los conductores es 205 A, por lo que el límite máximo de cargabilidad es 184.5 A (90% de I_{nom}).

Después de aplicar la metodología se encuentra una solución de restauración total, ya que son restaurados los 44 nodos que quedan por fuera de funcionamiento cuando se presenta la falla. La mayor caída de tensión se presentó en el nodo 50 con 5.57% y la línea con mayor cantidad de corriente es la línea 36 con 177.97 A.

De acuerdo a lo anterior:

- Nodos restaurados: todos.
- Potencia restaurada: 23.24 MVA.
- Nodos sin suministro de energía: ninguno.
- Potencia no restaurada: 0.0 MVA.
- Líneas de respaldo conectadas: 69 y 73.

En la Figura 4.8 se presenta el sistema restaurado.

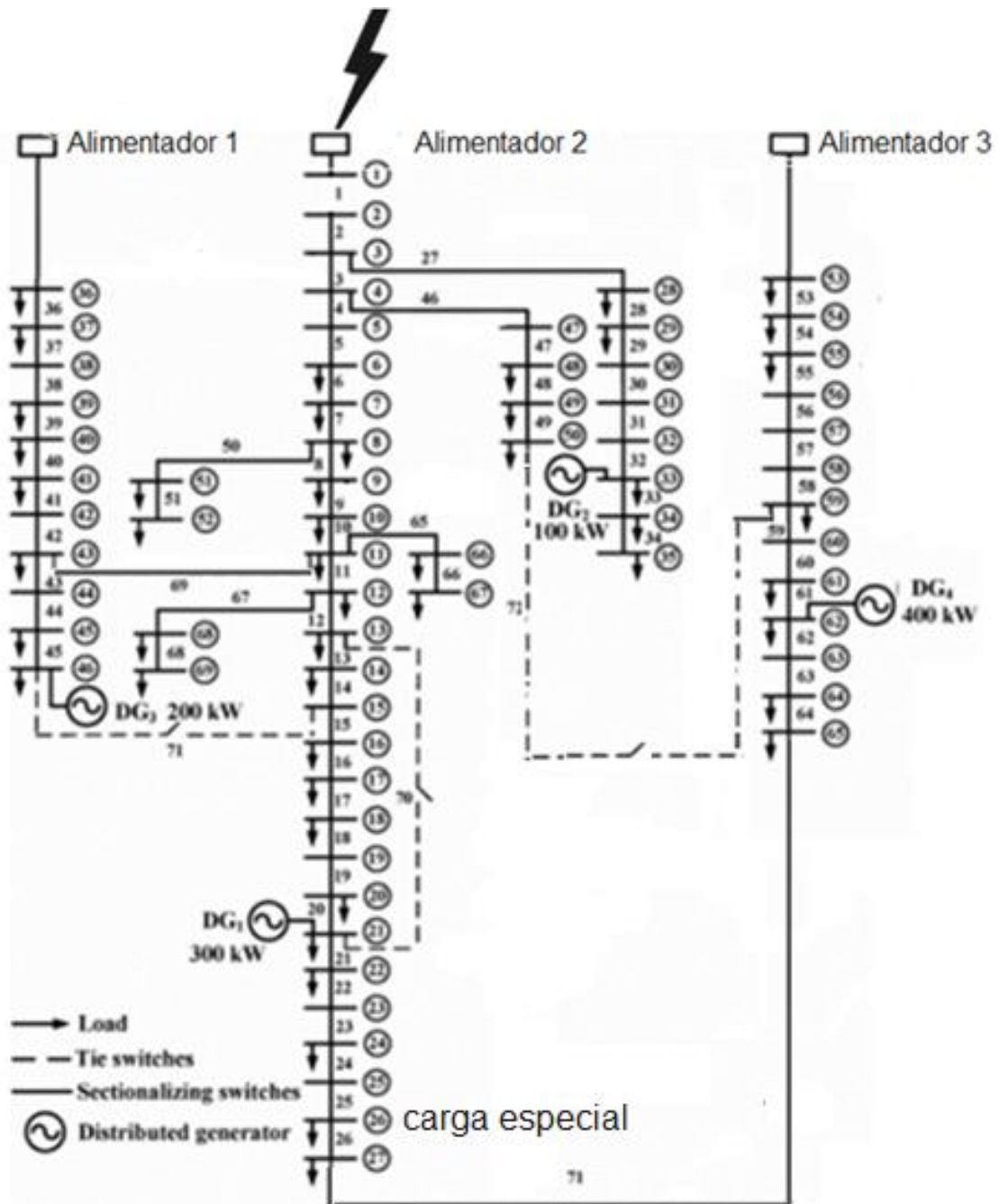


Figura 4.8. Sistema de prueba restaurado – Caso 2, Escenario 4

4.3 Consolidado de los resultados obtenidos

Con el objetivo de verificar la incidencia del uso de GD y la presencia de cargas especiales en los procesos de restauración de sistemas de distribución, se presentan en la Tabla 4.1 algunos aspectos comparativos de los resultados obtenidos en los numerales 4.1 y 4.2.

Tabla 4.1. Comparación de resultados obtenidos

Caso	Escenario	Potencia restaurada (MVA)	Cargabilidad máxima de líneas (%)	Regulación máxima (%)	Líneas de respaldo
1	1	0.678	184.32	5.72	69
	2	0.699	184.24	5.72	69
	3	1.622	161.62	4.60	69
	4	1.622	161.62	4.60	69
2	1	23.243	186.49	6.38	69 y 72
	2	16.846	171.46	8.15	71 y 73
	3	23.243	167.70	5.33	69
	4	23.243	177.97	5.57	69 y 73

De la Tabla 4.1 se observa lo siguiente:

- En ambos casos, todos los escenarios que cuentan con GD (escenarios 3 y 4), permiten restaurar una mayor cantidad de potencia que los otros escenarios (escenarios 1 y 2).
- La presencia de cargas especiales puede afectar la potencia restaurada, dado que garantizar que dicha carga sea restaurada puede generar caminos topológicos de restauración que terminen ingresando valores distintos de carga global restaurada, comparado con el caso en que dicha carga fuera de tipo general.
- Los escenarios que cuentan con GD presentan menor cargabilidad en las líneas que los otros escenarios.
- Los escenarios que cuentan con GD permiten obtener mejores niveles de regulación de tensión (menores valores), que los otros escenarios.

Finalmente, de las Figuras 4.2 a 4.8 se observa que para el Caso 1 existen 3 escenarios que presentan una configuración topológica enmallada; esto se debe a que en el momento de conectar dos o más líneas de respaldo con distintos alimentadores, se generan caminos alternos hacia los nodos de referencia. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, bajo situaciones de contingencia, este tipo de topologías son permitidas por algunos OR dado que la prioridad es ingresar el mayor número posible de cargas.

Capítulo 5

Conclusiones y trabajos futuros

5.1. Conclusiones

- Se desarrolló una metodología para la restauración de sistemas de distribución de energía eléctrica utilizando una técnica heurística que considera teoría de grafos, encontrando soluciones atractivas y cuya operación cumple con todas las restricciones técnicas y operativas, para estados temporales de emergencia.
- La metodología presentada es una herramienta válida para realizar la restauración de redes de distribución ante estados de emergencia. Permite minimizar la potencia no servida y garantizar la restauración prioritaria de cargas especiales cuando la red cuenta con este tipo de cargas.
- La metodología desarrollada se implementó en un sistema de prueba típico de la IEEE con dos casos de prueba y cuatro escenarios de operación, que permitieron evaluar la incidencia de la presencia de GD y de cargas especiales en procesos de restauración de redes de distribución eléctrica. Se evaluaron variables operativas de funcionamiento y variables de control del proceso de restauración de sistemas de distribución eléctrica, permitiendo concluir que la inclusión de generación distribuida en redes de distribución eléctrica mejora la eficiencia de los procesos de restauración en estados de contingencia, ya que reduce considerablemente los índices de potencia no reconectada durante la restauración.
- Cuando se tienen cargas especiales conectadas en el sistema, estas inciden directamente en el orden del proceso de restauración y afectan los indicadores de potencia no servida tras la restauración, pues pueden quedar por fuera de funcionamiento un número mayor de cargas.
- En los procesos de restauración de redes de distribución con presencia de GD, se presentan mayores índices de potencia restaurada, mejores cargabilidades de líneas y menores caídas de tensión, que en los casos en que no se cuenta con estos dispositivos en la red.

5.2 Trabajos futuros

- Se pueden incluir otros criterios para el ordenamiento de las líneas de contingencia a conectar, como los nodos con mejores reservas de tensión y menores impedancias de Thévenin.
- Aplicar otras técnicas de solución como metaheurísticas o técnicas exactas.

Bibliografía

- [1] A.L. Morelato and A. Monticelli, "Heuristic search to distribution system restoration," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No.4, October 1989.
- [2] Y.Y. Hsu, H.S. YU, and S.K. Peng, "Heuristic search to distribution system restoration," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, No.4, April 1992.
- [3] W.M. Lin and H.C. Chin, "A new approach for distribution feeder reconfiguration for loss reduction and service restoration," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, No. 3, July 1998.
- [4] G.R. Raidl and B.A. Julstrom, "Edge Sets: An effective evolutionary coding of spanning trees," IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol. 7, No.3, June 2003.
- [5] Z.M. Yasin, T. Khawa, and A. Rahman, "Influence of distributed generation on distribution network performance during network reconfiguration for service restoration," *First International Power and Energy Conference*, November 2006.
- [6] A. Cárcamo, L. García, and J.E. Pezoa, "Greedy reconfiguration algorithms for medium-voltage distribution networks," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 24, No. 1, January 2009.
- [7] N. Rugthaicharoencheep and S. Sirisumrannukul, "Feeder reconfiguration with dispatchable distributed generators in distribution system by Tabu Search," *44th International Universities Power Engineering Conference*, March 2009.
- [8] R.I. Bolaños, "Solución al problema de la restauración del servicio en sistemas de distribución usando técnicas heurísticas," Tesis de Grado, Programa de Ingeniería Eléctrica, Universidad Tecnológica de Pereira, 2013.

- [9] G. Salazar G, L. Chusin L, and B. Escobar B, “Análisis de confiabilidad de sistemas de distribución eléctrica con penetración de generación distribuida,” *Revista Politécnica*, Vol. 36, No. 1, Septiembre 2015.
- [10] R. Ramírez, “Redes de Distribución de Energía,” Universidad Nacional de Colombia, Tercera Edición, Manizales 2009.
- [11] R.A. Gallego, A.H. Escobar, E.M. Toro, “Técnicas metaheurísticas de optimización,” *Texto Universitario*, Segunda Edición, Universidad Tecnológica de Pereira, Julio 2008.
- [12] J. Grainger and W. Stevenson, “Análisis de Sistemas de Potencia,” McGraw Hill, 1998.
- [13] B. Akduman, B. Türkay, and A.Ş. Uyar, “Service restoration in distribution systems using an evolutionary algorithm,” *7th Mediterranean Conference and Exhibition on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion*, November 2010.